

# System przetwarzania danych pomiarowych wykorzystujący SPC do obróbki krótkich serii zgodny z ideą Przemysłu 4.0

Przemysław Oborski, Bartłomiej Bielicki

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań opracowanej metody efektywnego pomiaru części w przemyśle lotniczym, redukującej zaangażowanie pracowników i umożliwiającej sterowanie procesem w oparciu o wyniki pomiarów. Stosując ideę SPC opracowano metodę analizy danych dostosowaną do nadzorowania i sterowania produkcją krótkich serii wysoko dokładnych części. Została ona zaimplementowana w zbudowanym w ramach badań systemie pomiarowym składającym się z dedykowanej aplikacji informatycznej współpracującej z systemem ERP zarządzającym zleceniami produkcyjnymi, systemem zarządzania danymi technologicznymi i pomiarowymi oraz elektronicznymi urządzeniami pomiarowymi. Zbudowany system pomiarowy pozwalający na automatyzację zaawansowanego przetwarzania danych pomiarowych jest obecnie poddawany testom przemysłowym.

**Słowa kluczowe:** systemy pomiarowe, Statystyczne Sterowanie Procesami, wytwarzanie, produkcja małoseryjna, obróbka części lotniczych, automatyzacja, integracja informatyczna, Przemysł 4.0

## 1. Wprowadzenie

Zwiększenie wydajności produkcji przy stale rosnących wymaganiach odnośnie dokładności obróbki części wymaga zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania danych pomiarowych. Najwyższe dokładności obróbki skrawaniem wymagane są m.in. w branży lotniczej. Części do silników odrzutowych produkowane są z bardzo trudno obrabianych materiałów na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Pomiary geometryczne wymiarów wykonywanej części przeprowadzane przez operatora na stanowisku pracy, przy maszynie muszą być bardzo dokładne, niezależnie od wahań temperatury czy zmęczenia pracownika. Na bazie wykrytych trendów zmian wyników pomiaru powinna być możliwa regulacja parametrów procesu obróbkowego zapewniająca najlepszą jakość wytwarzania. Wzrost wydajności obróbki wymaga zmniejszania liczby operacji pomiarowych, w związku z tym najlepiej byłoby mierzyć wybrane części w danej serii. W przemyśle lotniczym, jednak w przeciwieństwie do branży motoryzacyjnej, przedmioty wytwarzane są w krótkich seriach liczących po kilka sztuk. Specyfika ta uniemożliwia bezpośrednie wykorzystanie znanych

metod Statystycznego Sterowania Produkcją (SPC) i wspierających je dostępnych systemów pomiarowych.

Coraz więcej firm decyduje się na wprowadzenie systemów automatyki oraz informatyki w celu usprawnienia produkcji. Centra obróbkowe i zintegrowane linie produkcyjne mają na celu zmniejszenie kosztów oraz zwiększenie wydajności produkcji [1]. Bardzo często nad maszynami czuwają systemy informatyczne, które mają za zadanie nadzorować pracę wszystkich urządzeń [2]. Pozwalają one na wykorzystanie linii produkcyjnej z jak największą wydajnością, zarządzają realizacją zleceń, stanem maszyn, powinny również alarmować w przypadku wystąpienia usterek [3]. Ważnym aspektem jest sterowanie jakością procesu produkcyjnego. Ma ono na celu realizację coraz większych wymagań geometrycznych, powtarzalnych dla każdego przedmiotu. Jednocześnie powinno ono umożliwić redukcję liczby operacji pomiarowych, pozwalając na dokonywanie pomiarów wybranych losowo części. W produkcji masowej i wielkoseryjnej w tym celu wykorzystuje się Statystyczne Sterowanie Produkcją. Przy odpowiednio dużej liczbie powtarzalnych produktów umożliwia ono prowadzenie na bieżąco analizy statystycznej osiągniętych parametrów wymiarowych. Pozwala to zredukować liczbę operacji pomiarowych oraz umożliwia sterowanie parametrami procesu, z wyprzedzeniem zapobiegając ich zmianie na wartości niedopuszczalne skutkujące wytwarzaniem braków [2]. Z uwagi na wymaganą dużą liczbę części w serii, SPC nie znajduje zastosowania w produkcji małoseryjnej lub jednostkowej. W produkcji tej bardzo często dokładność wykonania jest znacznie ważniejsza niż w produkcji wielkoseryjnej, przykładem może być przemysł lotniczy. W wielu zakładach, z powodu braku standardowych rozwiązań systemów IT, wykonane pomiary każdej części zapisuje się na kartach, które służą do późniejszego skontrolowania wykonania produktu. Zwiększa to koszt produkcji spowodowany

### Autor korespondujący:

Przemysław Oborski, p.oborski@wip.pw.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 22.11.2016 r., przyjęty do druku 26.05.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

brakiem automatyzacji przetwarzania danych pomiarowych oraz zwiększa liczbę braków uniemożliwiając reagowanie z wyprzedzeniem na symptomy zmian zachowania się obrabiarki i ustaleń procesu.

## 2. Metrologia – podstawowe pojęcia

O poprawności wykonania wyrobu świadczą cechy określone przez konstruktora i technologa, takie jak: wymiary geometryczne, twardość, chropowatość, płaskość itp. Z punktu widzenia obróbki mechanicznej, jednymi z najważniejszych cech są wymiary geometryczne [3]. W trakcie produkcji niezbędne jest dokonywanie pomiarów długości i kąta w celu określenia geometrycznej postaci kształtu wyrobów. Dziedzina ta, zwana metrologią techniczną, obejmuje m.in. pomiary [4]:

- wymiarów określających kształt geometryczny,
- odchyłek od wymaganego kształtu,
- chropowatości i falistości powierzchni,
- wad struktury geometrycznej powierzchni.

Z metrologią i pomiarami związane są takie zagadnienia jak: tolerancja, pasowanie części maszyn, wzorcowanie, sprawdzanie i ocena dokładności urządzeń pomiarowych oraz błędy pomiarowe. Podstawowe pojęcia metrologiczne istotne dla realizowanych badań można zdefiniować następująco [5]:

- Wielkość – właściwość, którą można w wyniku pomiaru przedstawić ilościowo wykorzystując liczby i odniesienia. Właściwości, których nie da się wyrazić ilościowo nazywa się cechami jakościowymi.
- Pomiar – proces doświadczalnego wyznaczenia jednej lub więcej wartości wielkości.
- Wartość wielkości – użyte razem liczba i odniesienie służące do liczbowego wyrażenia mierzonej wielkości. Pomiary wykonuje się urządzeniami pomiarowymi, które można podzielić na trzy grupy:
  1. wzorce – płytki wzorcowe, odważniki, wzorce twardości,
  2. przyrządy pomiarowe ze zmiennymi nastawami – np. mikrometr, suwmiarka,
  3. przyrządy pomiarowe do pomiaru z góry określonego wymiaru lub wymiarów – sprawdziany.
- Wzorce pomiarowe – realizacja definicji danej wielkości o wiadomej wartości wielkości, posiadająca określoną możliwie najmniejszą niepewność pomiaru. Stanowią one odniesienie do wzorcowania narzędzi pomiarowych.
- Przyrząd pomiarowy – urządzenie służące do wykonywania pomiarów, może być użyte w połączeniu z jednym lub z wieloma urządzeniami dodatkowymi.
- Układ pomiarowy – zbiór urządzeń pomiarowych oraz urządzeń wspomagających niezbędnych w procesie uzyskania wartości mierzonej wielkości.
- System pomiarowy – układ pomiarowy wyposażony dodatkowo w układ elektroniczny wraz z oprogramowaniem służący do zbierania, przetwarzania i archiwizowania danych pomiarowych.

## 3. Błędy pomiarowe

Żaden dokonywany pomiar nie jest w stanie odwzorować dokładnie wartości mierzonej wielkości, jest on obciążony błędem pomiarowym wynikającym z wielu niedoskonałości. Błąd pomiarowy, równanie (1), jest różnicą między wynikiem pomiaru ( $\hat{x}$ ) a wartością prawdziwą wielkości mierzonej ( $\bar{x}$ ) [4].

$$\Delta = \hat{x} - \bar{x} \quad (1)$$

Dokładnej wartości błędu nie można wyliczyć, jest ona szacowana lub wyznaczana z określoną niepewnością pomiarową odnosząca się do wartości pomiaru. Najczęściej występujące błędy pomiarowe to błędy: systematyczne, przypadkowe, graniczne przyrządu pomiarowego, rozdzielczości, paralaksy, całkowity błąd odczytu, spowodowane oddziaływaniami cieplnymi. Poniżej zdefiniowano błędy mające największy wpływ na pomiary wykonywane w trakcie produkcji:

**Błąd systematyczny** – różnica między wartością średnią z nieskończonej liczby wyników pomiarów wykonanych w warunkach powtarzalności ( $\bar{x}$ ), a wartością prawdziwą wielkości mierzonej ( $\bar{x}$ ) [5].

$$\Delta = \bar{x} - \hat{x} \quad (2)$$

Podczas pomiarów tej samej wielkości może on być stały lub zmieniać się w sposób przewidywalny. W trakcie pomiarów warunki powtarzalności zachodzą, gdy wykorzystywana jest ta sama metoda pomiarowa, pomiary wykonuje ten sam operator, używane jest to samo narzędzie pomiarowe, pomiary wykonuje się w tym samym miejscu, powtarzane są one w krótkich odstępach czasu, panują stałe warunki ich użytkowania [2]. Niemożliwe jest uzyskanie dokładnej wartości błędu systematycznego – konieczne byłoby wykonanie nieskończonej liczby pomiarów. Można jednak wyznaczyć w przybliżeniu jego wartość, a następnie zminimalizować skutki wprowadzając poprawkę do wyników pomiarów.

**Błąd przypadkowy** – wyznaczany przez odjęcie od wyniku pomiaru ( $\hat{x}$ ) średniej z nieskończonej liczby wyników pomiarów ( $\bar{x}$ ).

$$\Delta = \hat{x} - \bar{x} \quad (3)$$

W przeciwieństwie do błędu systematycznego, błąd przypadkowy jest nieprzewidywalny – ma rozkład losowy. Ponieważ uzyskanie nieskończonej liczby pomiarów jest niemożliwe, przyjmuje się, że jeżeli ich liczba przekracza 30, to błędy przypadkowe mają rozkład normalny – Gaussa.

**Maksymalny błąd graniczny (MPE)** przyrządu pomiarowego – skrajna wartość błędu, która wynika z warunków technicznych danego urządzenia pomiarowego. W teorii można przyjąć błąd graniczny jako wystarczającą wartość niepewności pomiaru, jednak MPE jest podawane przez producenta dla warunków znamionowych. Ponieważ często trudno jest uzyskać takie warunki, zaleca się uwzględnianie również innych źródeł niepewności. Dla przyrządów cyfrowych MPE jest określane zgodnie ze wzorem:

$$MPE_{Digit} = \pm(\% \cdot \text{wartość\_odczytana} + \% \cdot \text{zakres\_pomiarów}) \quad (4)$$

Podawana przez producentów urządzeń cyfrowych wartość MPE najczęściej zamieszczana jest w tabeli z danymi charakteryzującymi dane urządzenie.

**Błąd rozdzielczości** – równy jest połowie działki elementarnej, a w przyrządach cyfrowych połowie rozdzielczości.

**Błąd spowodowany odkształceniami cieplnymi** – temperatura jest czynnikiem zewnętrznym, zwykle najbardziej oddziaływujących na wynik pomiaru. Norma ISO 1:2002, jako temperaturę odniesienia w trakcie wykonywania pomiarów podaje 20 °C. Pomiary przedmiotu zmieniającego wymiary pod wpływem temperatury powinny uwzględniać poprawkę temperaturową (kompensację), która jest zdefiniowana następująco:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot (T - T_{odn}) \quad (5)$$

gdzie:  $l$  – mierzona długość w temperaturze odniesienia,  $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej przedmiotu,  $T$  – temperatura przedmiotu w trakcie pomiaru,  $T_{odn}$  – temperatura odniesienia.

Zmiany temperatury również oddziałują na przyrząd pomiarowy, dlatego powinien on być wzorcowany w temperaturze, w której będzie używany do pomiarów. Najskuteczniejszym sposobem uniknięcia błędów spowodowanych oddziaływaniami cieplnymi jest zminimalizowanie tego czynnika. W pomieszczeniach laboratoriów pomiarowych utrzymywana jest stała temperatura na poziomie 20 °C, a przedmioty poddaje się stabilizacji temperaturowej – przetrzymaniu w laboratorium do momentu osiągnięcia temperatury otoczenia.

**Błędy nadmierne** (grube, omyłki) – powstają wskutek mylnego odczytania wskazań, niewłaściwego zastosowania przyrządu pomiarowego, błędów obliczeniowych, zakłócenia w komunikacji. Można je wyeliminować z serii przez analizę wyników wykrywającą znaczne odchylenie od wartości średniej pomiarów obarczonych zwykłym błędem przypadkowym.

## 4. Niepewność pomiaru

Wszystkie wyniki pomiaru obciążone są błędami pomiarowymi, a w przypadku większości z nich trudno jest ustalić dokładną wartość błędu. Niepewność pomiaru ma za zadanie poinformowanie, że dokładność pomiaru jest skończona. Jest to parametr, który razem z wynikiem pomiaru tworzy przedział, w którym znajduje się, z pewnym prawdopodobieństwem  $P < 1$ , rzeczywista wartość (np. wymiaru przedmiotu mierzonego).

$$x_p = x \pm U(x) \quad (6)$$

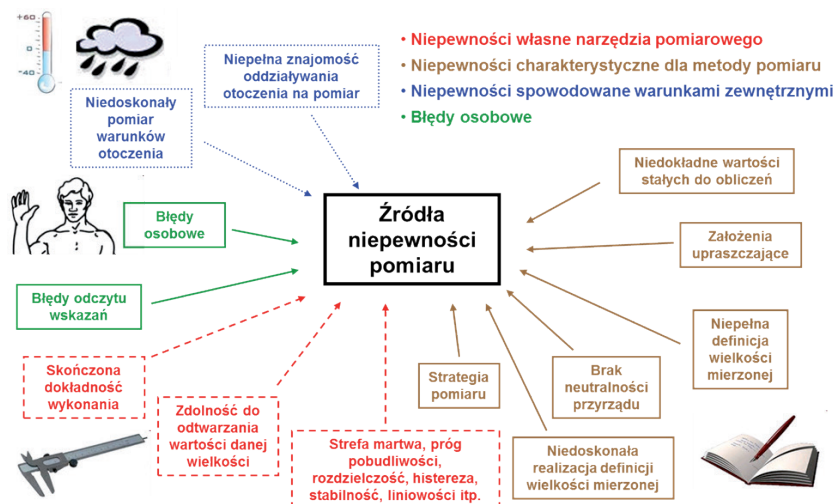
Na niepewność pomiaru wpływa bardzo wiele czynników. Niektóre z nich można wyznaczyć na podstawie zakładanych rozkładów prawdopodobieństwa, opartych na doświadczeniu bądź innych informacjach. Jeszcze inne mogą charakteryzować się rozkładem statystycznym wyników serii pomiarów. Przyjmuje się, że wszystkie te czynniki wnoszą swój wkład do niepewności złożonej.

Rozróżnia się następujące niepewności pomiarowe:

- niepewności standardowe A i B,
- niepewność standardowa złożona,
- niepewność rozszerzona.

**Niepewność standardowa** – równa jest odchyleniu standardowemu wartości średniej  $s(\bar{x})$ . Oznaczana jest literą  $u$  z wartością, do której się odnosi w nawiasie, np.  $u(x)$ . Niepewność standardowa dzieli się na dwie kategorie:

- A – wyznaczana za pomocą metod statystycznych,
- B – wyznaczana innymi metodami.



Rys. 1. Źródła niepewności pomiaru [6]

Fig. 1. Sources of measurement uncertainty [6]

Całkowita niepewność pomiaru składa się z obydwu tych składowych.

**Niepewność standardowa typu A** – można ją oszacować, jeżeli pomiary wykonywane są w warunkach powtarzalności, czyli każdy pomiar zrealizowany był w takich samych warunkach. Otrzymane  $n$  wyników przyjmuje najczęściej rozkład przybliżony do rozkładu normalnego Gaussa. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu Gaussa dla zmiennej losowej definiuje się następująco:

$$f_{\mu, \sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

Niepewność standardową typu A określa odchylenie standardowe wartości średniej zebranych wyników pomiarów tej samej wielkości.

$$u(\bar{x}) = \sigma \quad (8)$$

Z kolei odchylenie standardowe opisuje wzór:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_{sr} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (9)$$

**Niepewność standardowa typu B** – jej źródłem są błędy systematyczne, których nie można wyeliminować ze względu na nieznaną ich wartość lub z powodu uproszczenia wyliczeń. Nie mają one rozkładu losowego i nie można ich wyliczyć metodami statystycznymi. Do oszacowania niepewności standardowej typu B wykorzystuje się najczęściej informacje o właściwościach przyrządów pomiarowych podane przez producenta. Niepewność standardową typu B wyznacza się z równania:

$$u_b(x) = \frac{U_b(x)}{k_b} \quad (10)$$

gdzie:  $U_b(x)$  – niepewność rozszerzona podana przez producenta lub zawarta w innych dokumentach,  $k_b$  – współczynnik rozszerzenia.

**Niepewność standardowa złożona** – suma geometryczna niepewności typu A i B.

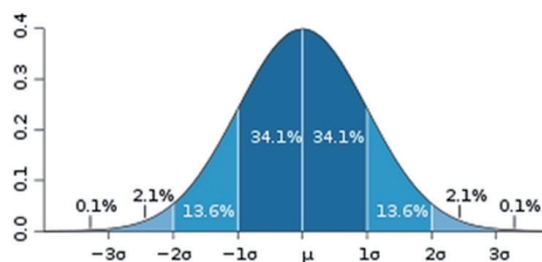
$$u(\bar{x}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}) + u_B^2(\bar{x})} \quad (11)$$

**Niepewność rozszerzona** – niepewność standardowa pomnożona przez współczynnik  $k$ , będąca oszacowaniem przedziału, w którym może znaleźć się wartość prawdziwa. Im zakładamy większe prawdopodobieństwo, tym ów przedział będzie większy. Wartość współczynnika  $k$  najczęściej wynosi 2 lub 3. Dla rozkładu normalnego błędów pomiaru  $k = 2$  oznacza poziom ufności około 95%, a dla  $k = 3$  oznacza poziom ufności ponad 99%. Na rys. 2 przedstawiono jak zwiększanie zakresu niepewności o kolejne krotności odchylenia standardowego wpływa na zwiększanie prawdopodobieństwa występowania mierzonej wartości.

## 5. Statystyczne Sterowanie Procesem

Statystyczne Sterowanie Procesem (ang. *Statistical Process Control*) jest realizowaną w czasie rzeczywistym kontrolą przebiegu procesu, wykorzystującą metody staty-





Rys. 2. Rozkład normalny z zaznaczonymi przedziałami prawdopodobieństwa [7]

Fig. 2. Gaussian distribution with probability intervals [7]

styczne. Ma ona na celu wykrywanie rozregulowań oraz ciągle poprawianie parametrów procesu przez korygowanie ustawień obrabiarki [8]. SPC bazuje na analizie wielkości rozrzutu oraz stopnia wycentrowania procesu [2]. Od zwykłej kontroli różni się tym, że wykonywana jest w trakcie procesu a nie po nim i może wpływać na jego parametry. Generalna zasada polega na ustabilizowaniu procesu, zawężeniu granic tolerancji obróbkowych w stosunku do tolerancji konstrukcyjnej i okresowym sprawdzaniu, czy średnia wartość danego wymiaru nie przesuwa się poza ustalone wartości ostrzegawcze. W przypadku wystąpienia narastających błędów operator jest o tym informowany zanim jeszcze przekroczone zostaną wymiary konstrukcyjne, co skutkowało by powstaniem braku. Operator ma możliwość skorygowania parametrów obróbkowych w celu doregulowania procesu. Zgodnie z funkcją Taguchiego określaną wzorem:

$$L = k[S^2 + (\bar{y} - m)^2] \quad (12)$$

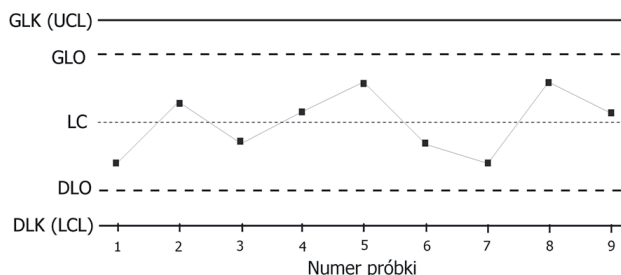
gdzie:  $S^2$  – wariancja mierzonego wymiaru przedmiotu,  $\bar{y}$  – średni wymiar przedmiotu,  $m$  – wartość nominalna (oczekiwana) wymiaru.

Strata jest wielkością ciągłą, której minimum określa wartość docelową – najbardziej optymalną, odpowiadającą oczekiwaniom klienta. Koszty wad rosną wraz ze wzrostem odchylenia wartości cechy przedmiotu od wartości oczekiwanej. Celem SPC jest utrzymanie średniej wartości cech produktów jak najbliższej wartości docelowej, nawet wtedy, gdy rozrzut zajmuje niewielką część zakresu tolerancji.

## 5.1. Karty kontrolne

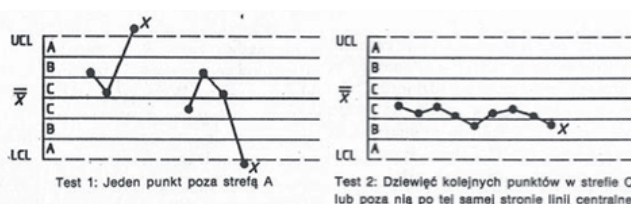
Podstawowym narzędziem SPC wspomagającym regulację procesów są karty kontrolne, przedstawiające w sposób graficzny dane procesu. Są to wartości pomiaru próbek o małej liczności wybranych spośród wytwarzanych części, prezentowane na wykresie – karcie kontrolnej z linią centralną, której wartość przedstawia średnią oczekiwaną [10]. Na rys. 3 przedstawiono przykład karty kontrolnej, gdzie: GLK – górna linia kontrolna; GLO – górna linia ostrzegawcza; LC – linia kontrolna; DLO – dolna linia ostrzegawcza; DLK – dolna linia kontrolna. Linie kontrolne są najczęściej nanoszone są w odległości  $\pm 3\sigma$  od linii centralnej, gdzie  $\sigma$  jest odchyleniem standardowym wartości średnich z próbek.

Wykroczenie wartości danych poza strefę wyznaczoną przez te linie informuje o rozregulowaniu procesu. Opcjonalnie mogą być wykreślone granice ostrzegawcze, jej przekroczenie alarmuje operatora, że proces jest bliski rozregulowaniu. Alarmy mogą być wywołane także po pojawieniu się specyficznych zachowań przebiegu danych na karcie kontrolnej. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe alarmy, przy czym podane przebiegi i wartości nie są obowiązujące dla każdego procesu – mogą być zmieniane, by lepiej działały w danej operacji obróbkowej. Wylizanie linii kontrolnych jest realizowane za pomocą metod statystycznych, w związku z tym potrzebne jest co najmniej 25–30 kilkueleментowych próbek do wyznaczenia granic kontrolnych. Z tego



Rys. 3. Przykład karty kontrolnej [9]

Fig. 3. Example of the control card [9]



Rys. 4. Przykładowe naruszenia stabilności procesu [9]

Fig. 4. Examples of the process stability overstep [9]

powodu SPC najlepiej sprawdza się w produkcji seryjnej – próbki są  $n$ -elementowe, a do pomiarów wybieranych jest kilka wyrobów z każdej serii.

SPC można stosować w różnych procesach i istnieje wiele rodzajów kart kontrolnych dostosowanych do specyfiki poszczególnych rodzajów pomiarów [2]:

### 1. Klasykne karty kontrolne

#### a) Karty kontrolne dla cech dyskretnych:

- karta np (liczba egzemplarzy wadliwych w próbkach o jednakowej liczności),
- karta p (udział egzemplarzy wadliwych w próbkach o różnej liczności),
- karta c (wyznaczanie liczby niezgodności w stałym obszarze),
- karta u (wyznaczanie liczby niezgodności w zmiennym obszarze);

#### b) Karty kontrolne dla cech ciągłych:

- karta  $\bar{x}$ -R (liczność próbek  $1 < n < 10$ ),
- karta  $\bar{x}$ -s (liczność próbek  $n > 9$ ),
- karta  $\bar{x}$ -ME-R (liczność próbek  $n = 3, 5, 7$ );

### 2. Karty sekwencyjne:

- karta MA,
- karta EWMA,
- karta IX-MR,
- karta CUSUM;

### 3. Karty adaptacyjne:

- karta adaptacyjna rozkładu normalnego,
- karta adaptacyjna o rozkładzie innym niż normalny;

### 4. Karta wielowymiarowa T2Hotelinga

### 5. Karty o rozkładzie innym niż normalny

## 5.2. Karta IX-MR

Po przeprowadzeniu analizy różnych kart kontrolnych, do realizacji systemu pomiarowego została wybrana karta sekwencyjna IX-MR wrażliwa na małe odchylenia stabilności procesu. Stosowana jest głównie w produkcji małoseryjnej, ponieważ do obliczeń linii centralnej oraz granic kontrolnych brane są nie próbki, a pojedyncze pomiary.

Podobnie jak inne karty odnosi się ona do danych o charakterze losowym [11]. Linie karty oblicza się za pomocą równań: dla karty IX:

$$LCL = \bar{x} - 2,66\overline{MR} \quad (13)$$

$$CL = \bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (14)$$

$$UCL = \bar{x} + 2,66 \overline{MR} \quad (15)$$

dla karty MR:

$$CL = \overline{MR} = \frac{\sum MR}{n-1} \quad (16)$$

$$LCL = 0 \quad (17)$$

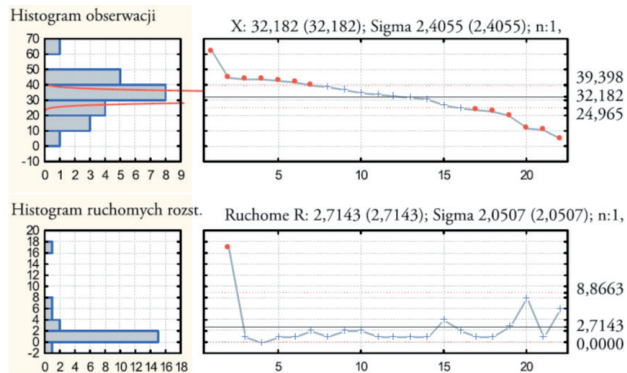
$$UCL = 3,27 \overline{MR} \quad (18)$$

$$\overline{MR} = |x_i - x_{i-1}| \quad (19)$$

Karta IX przedstawia każdy pomiar na wykresie z wartością średnią z tych pomiarów jako linią centralną. Natomiast karta ruchoma MR reprezentuje tzw. ruchome rozstępy, czyli różnicę wartości dwóch ostatnich wymiarów.

### 5.3. Zdolność procesu

Zdolność procesu określa stopień spełnienia przez dany proces wymogów jakościowych w zależności od wymaganej tolerancji danego wymiaru oraz rozrzutu wymiarów wykonanych przedmiotów. Zdolność procesu pozwala stwierdzić, ile wyrobów mieści się w założonych granicach tolerancji. Ocena zdolności polega na bezpośrednim odniesieniu rozrzutu wymiarów wykonanych przedmiotów, szacowanych najczęściej w oparciu o rozstęp lub odchylenie standardowe, do szerokości założonego



Rys. 5. Przykład karty IX i MR [12]

Fig. 5. Example of the IX and MR control cards [12]

pola tolerancji. Badanie zdolności przeprowadza się po przeprowadzeniu od 30 do 100 pomiarów wykonywanych przedmiotów, obliczając parametry [13]:

- średnią arytmetyczną,
- rozstęp,
- odchylenie standardowe,

W przypadku małej produkcji pomiarów może być mniej (nawet kilka), jednak wówczas wyznaczona zdolność jest mniej dokładna. Wartość średnia powinna pokrywać się ze środkiem pola tolerancji. Odchylenie standardowe może stanowić maksymalnie  $1/6$  pola tolerancji. Jeżeli przyjmiemy, że badana próba ma rozkład normalny, to pole tolerancji musi mieć szerokość co najmniej  $6\sigma$ , obejmując 99,74% wszystkich wyrobów. Optymalną sytuacją jest, gdy pole tolerancji ma szerokość 8, 10 lub nawet 12 wartości sigma. Im szerokość procesu jest mniejsza, w odniesieniu do szerokości pola tolerancji, tym proces ma większą zdolność. Rozstęp z kolei, będący różnicą między najwyższą a najniższą wartością zmiennej, pozwala na szybkie określenie obszaru zmienności badanej zmiennej.

W praktyce w SPC do wyznaczania zdolności procesu stosuje się wskaźniki  $C_p$  i  $C_{pk}$  [14]. Wskaźnik  $C_p$  nazywany precyzją pro-

cesu określa, na ile badany proces potrafi sprostać wymaganiom szerokości pasa tolerancji. Wskaźnik  $C_{pk}$  nazywany dokładnością procesu określa, czy i w jakim stopniu środek pasa tolerancji pokrywa się ze średnią wartością badanego parametru wytwarzanych wyrobów. Wskaźnik  $C_p$  jest szerokością pasa tolerancji odniesioną do sześciokrotnej wariancji badanego parametru, czyli obszaru, w którym powinno wystąpić 99,74% wyników pomiarów.  $C_p$  jest wielkością bezwymiarową i wynosi:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (20)$$

Natomiast wskaźnik  $C_{pk}$  jest stosunkiem mniejszej odległości między wartością średnią a brzegiem tolerancji odniesioną do jednej strony zakresu występowania 99,74% wyników. Jest również wielkością bezwymiarową i wynosi:

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right\} \quad (21)$$

gdzie: USL – górna granica tolerancji wymiaru, LSL – dolna granica tolerancji wymiaru,  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna wyników pomiaru,  $\sigma$  – odchylenie standardowe, czyli miara rozrzutu wyników badanego parametru

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (22)$$

Wartości wskaźników  $C_p$  i  $C_{pk}$  dla różnych produktów nie są stałe i zależą od wymagań stawianych produkowanym przedmiotom. Na ogół  $C_p$  jest równe 1 lub maksymalnie 1,33.  $C_{pk}$  powinno być możliwie bliskie  $C_p$ . Stosowanie powyższych wskaźników ma sens tylko w przypadku oceny zdolności procesów statystycznie ustabilizowanych. Aby sprawdzić stabilność nowego procesu, czyli na ile w sposób powtarzalny można prowadzić produkcję, należy dokonać pomiaru pierwszych 100–200 wyprodukowanych części i ocenić ich rozrzut. Im rozrzut jest mniejszy, tym większa jest pewność panowania nad procesem i tym samym możliwość redukcji liczby pomiarów jedynie do wybranych losowo przedmiotów. Przy produkcji w małych seriach ocena stabilności jest obciążona dużą niepewnością, w związku z tym wskaźniki zdolności procesu należy traktować orientacyjnie i nie można na ich podstawie redukować liczby dokonywanych pomiarów [15].

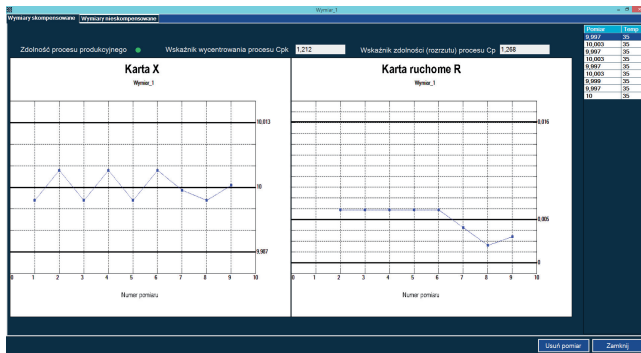
## 6. System przetwarzania danych pomiarowych

System przetwarzania danych pomiarowych zbudowany w ramach projektu, działający w środowisku Windows ma za zadanie cyfrowe zintegrowanie i zautomatyzowanie pozyskiwania i przetwarzania danych z pomiarów przeprowadzanych przez operatora przy obrabiarce.

Współpracuje on z większym systemem integrującym dane z monitorowania procesu produkcji i obrabiarce z systemami informatycznymi działającymi na poziomie zarządzania przedsiębiorstwem [16]. Zbudowany system przetwarzania danych pomiarowych wykorzystujący Statystyczne Sterowanie Procesem jest przeznaczony do obróbki wysokoprecyzyjnych części w przemyśle lotniczym wytwarzanych w krótkich seriach. Istotnym problemem badawczym było takie zaprojektowanie algorytmów przetwarzania danych i kart SPC, aby możliwe było zastosowanie metody statystycznego sterowania procesem do wytwarzania krótkich serii przedmiotów obejmujących kilka do kilkunastu sztuk. W sytuacji takiej, z uwagi na niewielką próbkę

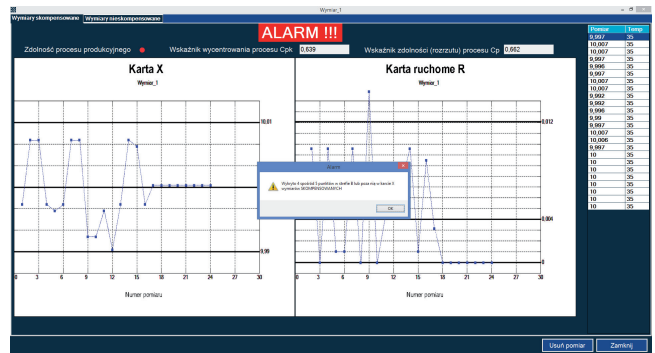






Rys. 10. Widok okna wymiar w stanie normalnym

Fig. 10. View of the dimension window in the normal stage



Rys. 11. Widok okna wymiar w stanie alarmującym

Fig. 11. View of the dimension window in stage of the alarm

- $n$  kolejnych punktów jest naprzemiennie rosnących lub malejących;
- $n$  z  $m$  kolejnych punktów jest w strefie A lub poza nią;
- $n$  z  $m$  kolejnych punktów jest w strefie B lub poza nią.

Wartości  $n$  i  $m$  są ustawiane przez użytkownika, na podstawie badań stabilności procesu przeprowadzanych w czasie wdrażania systemu.

W trakcie analizy aplikacja wylicza także zdolność procesu, poprzez odniesienie bezpośrednio jego rozrzutu szacowanego w oparciu o odchylenie standardowe do szerokości założonego pola tolerancji. Obliczana jest ona zgodnie z omówioną wcześniej metodą. Informacja o zdolności procesu, jeśli spełnia on warunki:  $C_p > 1$  i  $C_{pk} > 1$  oraz  $C_p \approx C_{pk}$ , jest wyświetlana na ekranie nad kartą kontrolną IX. W przypadku dokonania błędnego pomiaru można go wykonać jeszcze raz, po jego zaakceptowaniu dane są archiwizowane, jako dany wymiar danego przedmiotu.

W tej formie mogą być przesłane do aplikacji nadrzędnej zarządzania produkcją, z którą system może współpracować. Aplikacja przetwarzająca dane pomiarowe wykonuje również szereg działań w tle, takich jak bieżąca kontrola stanu połączenia z aplikacjami nadrzędnymi, narzędziami pomiarowymi czy monitorowaniem zmian temperatury na stanowisku.

## 7. Podsumowanie

Celem badań było opracowanie efektywnego systemu pozwalającego na integrację czynności pomiarowych wykonywanych przez operatora obrabiarki CNC z systemami IT przedsiębiorstwa. System przetwarzający pomiary umożliwia kontrolę procesów wytwórczych wymagających dużej dokładności wykonania oraz cechujących się niewielką liczbą przedmiotów w serii produkcyjnej. Zbudowany demonstrator systemu może być dostosowywany do potrzeb danej fabryki. Przygotowany system może działać zarówno samodzielnie, jak również może współpracować z innymi systemami informatycznymi przedsiębiorstwa, w tym systemami MRP zarządzającymi całością danych dotyczących realizacji zadań produkcyjnych. Zbudowana aplikacja może współpracować z systemem paneli operatorskich rozwijanym w ramach osobnego projektu. Wówczas umożliwia ona identyfikację przedmiotów i numerów operacji za pomocą czytników kodów kreskowych oraz bezpośrednie przyporządkowywanie danych z pomiarów do opisu realizowanego zlecenia produkcyjnego, a w nim do opisu danego przedmiotu w serii. W trakcie badań systemu zauważono istotny wpływ oddziaływania cieplnego na wyniki pomiarów. Ma to duże znaczenie przy długotrwałej obróbce skrawaniem generującej znaczne ilości ciepła. Szczególnie jest to widoczne w kartach kontrolnych, kreślonych oddzielnie dla wymiarów

skompensowanych oraz nieskompensowanych cieplnie. By uniknąć problemu nierównomiernego nagrzania mierzonego przedmiotu powinny być opracowane procedury określające, na jak długo przedmiot powinien być odłożony w celu uzyskania stabilizacji cieplnej.

Dalsze badania będą skupiały się na rozwoju systemu w kierunku uwzględnienia różnych rodzajów produkcji małoseryjnej. W badaniach uwzględnione zostaną różne rodzaje wyrobów w celu opracowania rozwiązania, które będzie można stosunkowo łatwo dostosowywać do wymagań różnych odbiorców i stosunkowo szybko wdrożone w specyficznych warunkach różnych zakładów produkcyjnych. Przedstawione badania są elementem szerokiego programu badawczego mającego na celu rozwój metod integracji informatycznej i automatyzacji przetwarzania danych na poziomie stanowisk obróbkowych o zróżnicowanym stopniu automatyzacji [17, 18]. Prowadzona tematyka badawcza odpowiadająca na zapotrzebowanie zaawansowanych firm produkcyjnych jest w pełni zgodna z ideą Przemysłu 4.0, dążącą do radykalnego zwiększania wydajności produkcji m.in. dzięki pełnej automatyzacji procesów przetwarzania informacji na poziomie wytwarzania [19].

## Bibliografia

1. Ribeiro L., Barata J., *Re-thinking diagnosis for future automation systems: An analysis of current diagnostic practices and their applicability in emerging IT based production paradigms*, "Computers in Industry" Vol. 62, 2011, 639–659.
2. Oborski P., *Integration of Advanced Monitoring in Manufacturing Systems*, "Journal of Machine Engineering", Vol. 15, No. 2, 2015, 55–68.
3. Oborski P., *Developments in integration of advanced monitoring systems*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology", Vol. 75, Iss. 9, 2014, 1613–1632.
4. Salaciński T., *SPC statystyczne sterowanie procesami produkcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
5. Lisowski M., *Podstawy metrologii*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
6. Jakubiec W., Zator S., Majda P., *Metrologia*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2014.
7. ISO Guide 99:PKN, Warszawa 2010.
8. Majda P., <http://slideplayer.pl/slide/9572697/#>
9. [http://www.naukowiec.org/images/upload/krzywa\\_gaussa.jpg](http://www.naukowiec.org/images/upload/krzywa_gaussa.jpg)
10. Grasso M., Albertelli P., Colosimo B., *An Adaptive SPC Approach for Multi-sensor Fusion and Monitoring of Time-varying Processes*, "Procedia CIRP", Vol. 12, 2013, 61–66.

11. Montgomery D.C., *Introduction to statistical quality control*, John Wiley & Sons 2008.
12. [http://www.zarz.agh.edu.pl/bsolinsk/karty\\_kontrolne](http://www.zarz.agh.edu.pl/bsolinsk/karty_kontrolne)
13. Mazurkiewicz J., Kliś J., Magner A., *Współczynnik zdolności procesu i związku z rozkładem normalnym*, „Problemy Jakości”, Nr 9, 2001, 26–28.
14. <http://przedsiębiorstwo.waw.pl/files/46/598/knob-3-2011-bartkowiak.pdf>
15. Iwasiewicz A., *Zarządzanie jakością*, PWN, Warszawa 1999.
16. Oborski P., Kapeluszyński T., Nowak J., Bielicki B., Fularski R., *Zintegrowany modułowy system monitorowania procesów wytwarzania dla przemysłu lotniczego*, „Mechanik”, Nr 8–9, 2016, 1494–1495.
17. Oborski P., *Kierunki rozwoju zintegrowanych systemów monitorowania procesów obróbki skrawaniem*, „Mechanik”, Nr. 8–9, 2014, 591–598.
18. Oborski P. *Integrated monitoring system of production processes*, „Management and Production Engineering Review”, Vol. 7, Nr 4, 2016, 86–96.
19. *Industry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector*, McKinsey & Company 2015.

## The System of Measurement Data Analysis Based on SPC Dedicated for Short Batches

**Abstract:** The article presents results of the research on new data analysing method suitable for control of production of high quality parts manufactured in short batches. The method was implemented in the IT measurement system. It allows automation of most of operations done by machine operator. It is also integrated with the ERP system for orders management, the system of process data management, barcodes sensors for parts and documentation identification and electronic measurement tools.

**Keywords:** measurement systems, Statistical Process Control, manufacturing, small batch production, airplane industry, shop floor control, automation, integration of data flow

### dr inż. Przemysław Oborski

p.oborski@wip.pw.edu.pl

Ekspert w zakresie automatyzacji systemów wytwarzania, sterowania nadrzędnego, integracji systemów sterowania i monitorowania, organizacji produkcji obejmującej zgodnych z ideą Przemysłu 4.0.



### inż. Bartłomiej Bielicki

bartekbielicki@gmail.com

Programista m.in. języka C#, Java, specjalista w zakresie automatyzacji urządzeń produkcyjnych.

